

Tomi Latvala

**PIIRILEVYN VÄLIKERROSTEN OPTIMOINTI JA VAIKUTUS
SAANTOON**

PIIRILEVYN VÄLIKERROSTEN OPTIMOINTI JA VAIKUTUS SAANTOON

Tomi Latvala
Opinnäytetyö
Kevät 2017
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka, tuotantotekniikka

Tekijä: Tomi Latvala

Opinnäytetyön nimi: Piirilevyn välikerrosten optimointi ja vaikutus saantoon

Työn ohjaajat: Mitri Mattila, Helena Tolonen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2017 Sivumäärä: 35

Työssä pyrittiin parantamaan piirilevyjen saantoa Aspocomp Oyj:ssä optimoimalla välikerrosten venytyksiä. Tavoitteiksi asetettiin optimaalisten venytysten löytäminen sekä lämpötiloista ja materiaalivaihteluista aiheutuvien erojen tutkiminen. Tehtävänä oli selvittää, millä vaihteluvälillä muutosten teko on kannattavaa, jotta venytyksiä pystytään tekemään mahdollisimman hyvän saannon aikaansaamiseksi. Venytyksiä on pakko tehdä, sillä prässäysprosessin jälkeen levyt kutistuvat lämpölaajenemisen ja kitkan vuoksi.

Työssä perehdyttiin monikerrospiirilevyjen valmistukseen sekä venytysten analysointiin tuotannonohjausjärjestelmän ja levyn mittoja analysoivan ohjelman avulla. Monikerrospiirilevyjen valmistusprosessi koostuu välikerrosten valmistuksesta, prässäyksestä, porauksesta, kuparoinnista, kuviopinnoituksesta, juotteenestopinnoituksesta ja loppupinnoituksesta. Venymiä tutkittiin eri tuotteissa MiniTab-ohjelmalla. Venytysten muokkaamiseen vaikuttavat käytettävät materiaalit ja tehtaan lämpötilavaihtelut. Eri tuotteissa käytetään eri materiaaleja eivätkä toimittajat lupaa samoja toleransseja jokaiselle toimituserälle. Lämpötilojen vaihtelu vaikuttaa lämpölaajenemiseen, mikä täytyy ottaa huomioon venytyksiä tehtäessä.

Venytysten nykyiset arvot haettiin ART600-ohjelmalla ja ne listattiin Excel-ohjelmaan, jossa niitä pystyttiin tarkastelemaan ja tekemään tarvittavat laskutoimitukset. Analysoinnin jälkeen laskettiin optimiarvot venytyksille. Arvot kirjattiin tuotannonohjausjärjestelmään ja tuotteet valmistettiin optimaalisia arvoja käyttäen.

Tutkimusten perusteella lotin vaihtuessa venymät voivat muuttua molemmissa x- ja y-suunnissa $38\text{ }\mu\text{m}$ ja materiaalien sisällä olevat erot x-y-suunnissa ovat $\pm 20\text{ }\mu\text{m}$. Lisäksi lämpötilamuutoksista aiheutuneet erot tarkastelluissa tuotteissa ovat kesäaikana $40 - 60\text{ }\mu\text{m}$ suuremmat kuin muina vuodenaikoina. Optimoinnin jälkeen kerrosten mitat saatiin samaan suhteeseen, mutta erien välillä tapahtuu venytysmuutoksia, jotka vaikuttavat poraustulokseen. Nämä muutokset aiheuttavat materiaali- ja lämpötilavaihteluista. Työn tulos helpottaa tuotannonsuunnittelijan työtä arvioida venytysmuutokset tuotteisiin.

Asiasanat: monikerrospiirilevyt, optimointi, saanto

ALKULAUSE

Tämä opinnäytetyö on tehty Aspocomp Group Oy:lle. Haluan kiittää koko Aspocomp Group Oy:n henkilökuntaa, varsinkin Process Manager Mitri Mattilaa ja Process Engineer Hannu-Heikki Sirviötä tuesta ja ohjauksesta työn aikana. Kiitos myös ohjaavalle opettajalleni, lehtori Helena Toloselle.

19.5.2017

Tomi Latvala

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	7
2 ASPOCOMP OYJ	8
3 MONIKERROSPIIRILEVYN VALMISTUS	9
3.1 Välikerrosten valmistus	10
3.2 Prässäys	10
3.3 Poraus	11
3.4 Kuparointi	12
3.5 Kuviopinnoitus	13
3.6 Juotteenestopinnoitus	13
3.7 Loppupinnoitus	14
4 VÄLIKERROSTEN ANALYSOINTI	15
4.1 Nykytila	15
4.2 Lämpötilojen vaihteluiden aiheuttamat muutokset venytyksissä	17
4.3 Materiaali vaihteluiden aiheuttamat muutokset venytyksissä	22
4.4 Laatuluokat	25
5 OPTIMAALISEN MUUTOKSEN TEKO JA SEURANTA	27
5.1 Tutkittava tuote	27
5.2 Muutosten teko ja seuranta	28
6 YHTEENVETO	33
LÄHTEET	35

SANASTO

ART600	levyn mittoja analysoiva tietokoneohjelma
DES-linja	sisäkerrosten valmistuksessa käytettävä linja, joka koostuu kehityksestä, syövytyksestä ja resistinpoistosta
galvanointi	korroosiolta suojaava vähemmän jalosta metallista tehty päällyste
pakka	välikerroslaminaateista koostuva monikerrospiirilevy
Pre-preg	resiinipitoinen lasikuitumatto, jota käytetään sisäkerrosten yhteen liittämässä
resisti	materiaali, johon voidaan siirtää haluttu johdinkuviointi
rpm	kierrosta minuutissa (rounds per minute)
venytys	Välikerroslaminaatin kohdistaminen joko pienentämällä tai suurentamalla sitä tarpeen mukaan.
välikerroslaminaatti	aihio, joka koostuu kahdesta kuparikerroksesta, joiden välissä on eristekerros
WiseTime	tuotannonohjausjärjestelmä
µm	mikrometri eli millimetrin tuhannesosa

1 JOHDANTO

Piirilevyn tehtävä on muodostaa komponenttien välille sähköinen liitäntä ja tarjota komponenteille kytkentäalusta. Piirilevyyn on syövytetty kuparista johtimia, jotka liittävät levyyn juotetut komponentit toisiinsa. Tästä muodostuu sähköisesti toimiva virtapiiri. Piirilevyjen valmistuksesta on tullut aiempaa haasteellisempaa elektroniikkalaitteiden kehityksen myötä. (1, s. 1 - 3.)

Monikerrospiirilevyn valmistusprosessi sisältää monia vaiheita. Se alkaa sisäkerrosten valmistuksella, jonka jälkeen seuraa prässäys. Prässäyksen tarkoitus on liittää välikerrosarkit yhteen. Tämän jälkeen piirilevy siirtyy poraukseen, jonka tarkoitus on valmistaa läpiviennit komponenteille. Seuraavaksi valmistetaan ulkokerrosten piirikuviointi ja päälle levitetään juotteenestopinnoite, jonka tarkoitus on suojata piirilevyä. Viimeisessä vaiheessa piirilevyt käsitellään loppupinnoitteella.

Työssä pyritään parantamaan piirilevyjen saantoa Aspocomp Oyj:ssä. Tällä hetkellä yritykselle tulee tappioita piirilevyistä, joiden venytykset eivät pysy toleranssissa. Työssä analysoidaan venytyksiä valituissa tuotteissa, tehdään tarvittavat muutokset ja seurataan muutosten vaikutuksia saantoon. Lisäksi työssä tutkitaan lämpötila- ja materiaalivaihteluiden vaikutuksia venytyksiin.

Työn teoriaosuudessa käsitellään piirilevyn koko valmistusprosessia, joista tärkeimmät vaiheet tämän työn kannalta ovat prässäys ja poraus. Prässäysprosessi vaikuttaa välikerroslaminaattien kohdistukseen, ja poraus on yksi tärkeimmistä prosessivaiheista onnistuneen piirilevyn valmistamisessa.

2 ASPOCOMP OYJ

Aspocomp Oyj perustettiin vuonna 1979, jolloin yhtiö kantoi nimeä Pohjois-Piiri Oy (2). Tehdas valmistaa korkean teknologian piirilevyjä ja se sijaitsee Teknolokiakylässä Oulussa. Sen pinta-ala on 7 000 m². Tehtaalla työskentelee yli sata henkilöä. Aspocompin tuotteita käytetään muun muassa tietoliikenneverkoissa ja -laitteissa, autoelektroniikassa, turvateknologian ja terveydenhuollon järjestelmissä, mikropiirien tuotekehityksessä sekä teollisuuden automaatiosovelluksissa. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Espoossa. Yritys on ISO 9001, ISO 14001 ja ISO/TS 16949:2009 -sertifioitu. Kuvassa 1 on kuva Oulun tehtaasta. (3.)

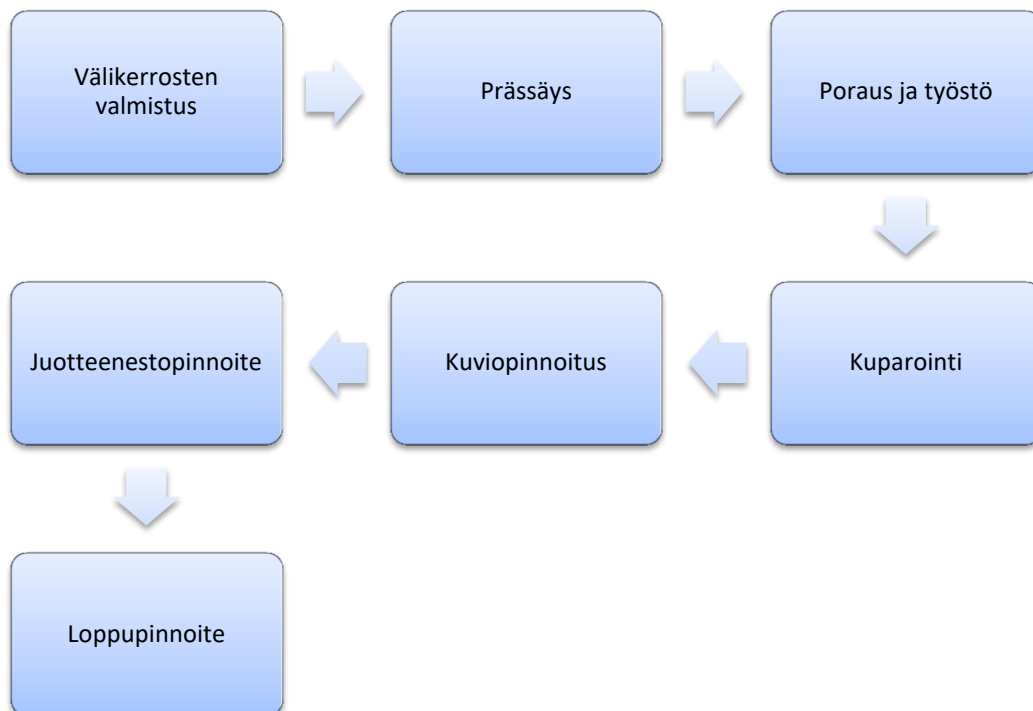


KUVA 1. Aspocomp Oyj:n Oulun tehdas (4)

3 MONIKERROSPIIRILEVYN VALMISTUS

Monikerrospiirilevyn tarkoitus on saada mahtumaan levyille 2-kerrospiirilevyjä suurempi määrä komponenttien välisiä yhteyksiä sekä saada aikaan sähköisiä erityisominaisuuksia, jotka eivät ole mahdollisia kaksikerroslevyillä. Monikerrospiirilevyn tuotantoprosessi on hyvin muutosherkkä. Lähes jokainen valmistusprosessin työvaihe vaikuttaa toisiin työvaiheisiin. Nimensä mukaan monikerrospiirilevy valmistetaan useista ohuista kaksikerroslevyistä, joista jokainen kerros prässätään yhdeksi monikerrospiirilevyksi. Monikerrospiirilevyn valmistus on monivaiheinen. Vaiheiden määrä riippuu asiakkaan vaatimasta tuotteesta, mutta perusvaiheet toistuvat lähes jokaisessa valmistusprosessissa. (5, s. 5 - 7; 6, s. 408.)

Tämä luku käsittelee välikerrosten valmistuksen, prässäyksen, porauksen, kuparoinnin, kuviopinnoituksen, juotteenestopinnoituksen ja loppupinnoitteen. Monikerrospiirilevyn valmistukseen tutustuttiin haastattelemalla prosessissa työntekijöitä ja tutustumalla kirjallisuuteen. Kuvassa 2 on piirilevyn valmistusprosessi.



KUVA 2. Piirilevyn valmistusprosessi (5, s. 5)

3.1 Välikerrosten valmistus

Sisäkerrosten valmistus on ensimmäinen vaihe monikerrospiirilevyn valmistuksessa. Tarvittavat välikerroslaminaatit syötetään ensimmäiseen prosessivaiheeseen, jota kutsutaan SK-kuvionsiirroksi. Nämä laminaatit muodostuvat kahdesta kuparipinnasta, joita erottaa eristekerros. Ensimmäinen vaihe prosessissa on laminointi, jossa välikerroslaminaatin kuparipinta laminoidaan valoherkällä resistillä molemmiin puolin levyä. Kuparipinta puhdistetaan ja levy kulkee laminaattorin läpi, jolloin resisti painetaan laminaatin pintaan. (5, s. 6 - 7.)

Kun resisti on painettu levyyn, seuraa valotus. Valotuksessa suositetaan laser-suoravalottimia (LDI, laser direct imaging) niiden hyvän tarkkuuden vuoksi. LDI:llä suoritetaan myös välikerrosten venytykset tai kutistukset. (1, s. 305-305). Resistit voidaan jakaa kahteen ryhmään. Ryhmiä kutsutaan negatiivisesti ja positiivisesti toimiviksi resisteiksi. Positiivisesti toimivissa resisteissä kehittyvät pois alueet, jotka valotetaan. Vastaavasti negatiivisissa resisteissä valolle altistumattomat alueet kehittyvät pois. (7, s. 607 - 614.)

Seuraavaksi seuraa kehitysvaihe, jossa laminaatin pintaan kehitetään resistikuvio. Tämän vaiheen jälkeen resisti on jäljellä vain niissä kohdin, joihin kuparin halutaan jäävän piirilevyllä. Kehitysvaihetta seuraa syövytysvaihe, jossa ylimääräinen kupari syövytetään pois. Tämän vaiheen jälkeen jäljelle jää johdinkuvio, jonka päällä on resisti. Resistin poistetaan strippausprosessissa, minkä seurauksena piirikuviollinen välikerroslevy on valmis. Prosessin lopussa porataan vielä kohdistusreiät prässäystä varten. Lopuksi levyt menevät vielä optiseen tarkastukseen ja jatkavat työpolkuaan eteenpäin. (7, s. 610 - 611.)

3.2 Prässäys

Prässäys suoritetaan optisen tarkastuksen jälkeen. Prässäysprosessin tarkoituksena on liittää yhteen välikerrosarkit yhdeksi jäykäksi piirilevyksi. Prosessi perustuu lämpöön ja +puristukseen. Lämpötilaa nostamalla saadaan epoksi sulamaan, jolloin se muuttuu juokseväksi. Puristuspainetta hyväksikäyttäen saadaan epoksi täyttämään jokainen aukko ja tyhjä tila. Jokaisen välikerroksen väliin ladotaan Pre-preg-kalvo, joka sisältää lasikuitua ja epoksia. Sen tehtävä on liittää välikerroslevyt toisiinsa muodostamalla eristekerroksen levyjen väliin.

Prässäysprosessin seurauksena on Pre-preg-kalvojen sulaminen yhtenäiseksi monikerrospiirilevyksi. (5, s. 16.)

Levyt kutistuvat aina prässäysprosessissa, joten tämän vuoksi niitä tulee venyttää etukäteen. Levyjen kutistuminen johtuu lämpölaajenemisesta ja välikerrosten sekä Pre-preg-kalvojen välisestä kitkasta. Välikerrosten väliin asetettavat Pre-preg-kalvot sulavat ensin lämmön ja paineen avulla. Tämän jälkeen ne kovettuvat ja jäähtyessään kutistuvat, vetäen välikerroksia puoleensa. (8.)

Prässäys tapahtuu usein hydraulisella laminointiprässillä. Välikerroslaminaateista koostuvaa monikerrospiirilevyä kutsutaan pakaksi. Operaattori asettaa prässättävän pakan painolevyn väliin. Painolevyn tulee olla suorassa ja sopivan kokoinen mahdollisimman tasaisen tuloksen saavuttamiseksi. Uudet prässit suorittavat laminoinnin tyhjiössä, joka tekee pakasta kosteus- ja liuotinainevapaan. Tyhjiöprässäyksen etuna on pienempi prässäyspaine, liitokset ilman huokosia ja parempi kerrosten välinen kohdistuvuus. (5, s. 16.)

3.3 Poraus

Poraus kuuluu tärkeimpiin työvaiheisiin piirilevyn valmistuksessa. Porauksen tarkoitus on muodostaa sähköliitäntä eri kerrosten välille sekä tarjota komponenteille alusta. Poraus suoritetaan CNC-porakoneilla, joiden nopeus voi olla 300 000 rpm. Porakoneiden tarkkuus on noin $\pm 18 \mu\text{m}$. (9.) Aspocompilla käytettävät porakoneet sisältävät lataajan, joka vaihtaa levyt automaattisesti uusiin, kun poraus on valmistunut. Porakoneet voivat säilöä jopa 3 200 terää kerralla. Porakoneiden terien vaihto suoritetaan automaattisesti, mutta terien lisäys tapahtuu manuaalisesti. Terien lisäys pyritään suorittamaan porakoneiden ollessa käynnissä, jolloin prosessissa vältetään turhilta pysähdyksiltä. (6, s. 425 - 454.)

Poraus aloitetaan niputusreiän porauksella, jonka tehtävä on mahdollistaa poraus mahdollisimman tarkasti sisäkerroksiin. Tässä hyödynnetään porakoneen röntgenominaisuutta, joka mahdollistaa sisäkerrosten tarkastelun. Niputusreiän porauksen jälkeen aihiot siirtyvät reunajyrsinnän kautta niputukseen. Niputuksessa piirilevyn alle nivotaan manuaalisesti aluskate ja päälle alumiinikate. Päälyyskatteen tarkoitus on parantaa poraamistarkkuutta ja vähentää porausjäys-

teen määrää. Tämän jälkeen nippu siirtyy porakoneelle. Aspocompilla on käytössä kaksi-, neljä- tai kahdeksankaraisia porakoneita. Porakoneet poraavat läpiviennit, jonka jälkeen niput puretaan ja aihiot siirtyvät jäysteenpoistoharjaukseen. (10.)

Porausongelmia

Monikerrospiirilevyjen porauksessa reiät on porattava kaksipuoleisia piirilevyjä varovaisemmin. Porausongelmia ovat muun muassa epoksijäämät, porausjäyste ja välikerrosjäyste. Levyyn kohdistuva rasitus tulee pitää alhaisena. Kun niputuskorkeus on pienempi eli porattavia levyjä on sopiva määrä päällekkäin, pysyy lämpötila porauksessa alhaisena ja epoksijäänteet vähenevät. Monikerrospiirilevyillä pidetään karanopeudet ja poran syöttö hieman alhaisempina, kuin kaksikerroslevyillä. Sallitut reikämäärät ovat monikerrospiirilevyillä 1 000 - 2 000 reikää eli pienemmät verrattuna kaksikerroslevyihin, joiden reikämäärät ovat 4 000 - 5 000 reikää. Levyt tulisi aina porata terävillä terillä, jolloin porauslämpötilat pysyvät alhaisina. (5, s. 18 - 21.)

3.4 Kuparointi

Kemiallisen kupariprosessin tarkoituksena on pinnoittaa ohut kuparikerros porattujen reikien seinämiin. Nykyään kuparointiprosesseja on erilaisia, mutta kemiallinen kuparointi on niistä yleisin. Kuparointiprosessiin sisältyy lukuisia eri vaiheita, joista esimerkkinä ovat huuhtelut, mikrosyövytys, pehmennys ja aktivointi. Metallointiprosessi koostuu kolmesta tärkeästä kylvystä, jotka ovat katalyyttinen kylpy, kiihdyttävä kylpy ja kemiallinen kuparikylpy. (5, s. 25.)

Ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan puhdistus, jossa epäpuhtaudet poistetaan levystä. Tämän jälkeen suoritetaan katalyyttinen kylpy, jossa käytetään tinan ja palladiumin yhdisteitä kolloidisena liuksena. Kuparin pinnoittamisessa on tärkeää saada yhtenäinen kuparipinnoite reiän seinämiin. Sen tulee olla vahvuudeltaan 1,5 - 2,2µm, jotta se kestäisi galvanoinnin esikäsitteilyn. Monimutkaisen prosessin ja kemiallisten reaktioiden jälkeen muodostuu ohut kuparikerros läpivientien ja reikien seinämille. (5, s. 26 - 29.)

3.5 Kuviopinnoitus

Kuviopinnoitus tai kuvionsiirto on vaihe, jossa piirilevyn johdinkuvio siirretään piirilevyn pinnalle. Resistillä laminoitu aihio valotetaan ja kehitetään niin, että resisti kehitetään pois niistä kohdista, joihin kuparipinnoite jää. Ne kohdat, joihin johdinkuviointi muodostetaan, kehitetään auki. Valotuksessa suositetaan tarkkaa LDI-menetelmää. Tämän menetelmän etuna on filmiin verrattuna se, että filmiin tullessa virhe toistuu se jokaisessa aihiossa. LDI-menetelmää käytettäessä tämä ei ole mahdollista. (7, s. 111- 113.)

Kehittämisen jälkeen levyt etenevät elektrolyyttiseen metallointiin, joka tapahtuu elektrolyytillä täytetyssä altaassa. Aihiot lasketaan altaaseen telineessä, joka on kytketty sähköisesti aihioden kuparipintoihin. Telineet ovat kytkettyinä virtalähteen negatiiviseen napaan, kun taas puhtaasta elektrolyytisestä kuparista olevat elektrodit ovat aihion molemmilla puolilla kytkettyinä virtalähteen positiiviseen napaan. Elektrodeihin johdetaan ennalta määrätty virta, joka vastaa telineessä olevien aihioden yhteistä johdinkuviopinta-alaa. Prosessissa muodostuu kupari-ioneja, jotka siirtyvät kylvyssä aihion pinnalle. Ionit pelkistyvät metalliseksi kupariksi aihion pintaan ja reikien seinämiin. (5, s. 35 - 37.)

Seuraavaksi kuparipinnan päälle pinnoitetaan tinapinnoite, joka toimii syövytysresistinä. Seuraavassa vaiheessa resisti voidaan poistaa huolellisesti, jotta välttää ongelmita syövytysvaiheessa. Tämän jälkeen paljaana oleva kupari syövytetään pois, tinapinnoitteen suojatessa johdinkuviointia. Lopuksi tina poistetaan piirilevyaihioiden päältä, jolloin ulkopinnan piirikuviointi on valmis.

3.6 Juotteenestopinnoitus

Juotteenestopinnoitteita käytettiin aluksi suojelemaan piirikuviointia kokoonpanovaiheessa, jolloin oikosulkujen eliminointi oli päätavoite. Kun juotteenestopinnoitteet yleistyivät ja materiaalien ominaisuudet paranivat, alettiin pinnoitteita käyttämään muun muassa suojaamaan piirilevyjä ympäristöllisiltä haitoilta. Juotteenestopinnoitteen tunnistaa piirilevyiltä sen yleisimmin käytetystä vihreästä väristä, jota kutsutaan myös maskiksi. (7, s. 775 - 776.)

Maskeja on kolmea erityyppiä. Ei-valotusta tarvitseva tekniikka on tyypeistä vanhin ja se on pysyvä juotosmaski. Tämä tekniikka ei ole kovin tarkka, joten sen käyttö nykyään on hyvin vähäistä. Tässä tekniikassa on tärkeää, että maskit sijoitetaan juuri oikeaan kohtaan piirilevyä, jossa ne kovetetaan UV-valolla. (7. s, 776 - 777.)

Toinen pysyvistä maskeista on valotusta tarvitseva maski, joka pystyy vastaamaan nykyajan tarkkoihin vaatimuksiin. Se on yleisimmin käytetty menetelmä piirilevyteollisuudessa. Valotettavia maskeja on saatavilla nestemäisinä ja kuivafilmeinä. (7. s, 777.)

Väliaikaiset juotosmaskit ovat tarkoitettu suojaamaan piirilevyä joiltakin tietyiltä kohdilta. Esimerkiksi, jos halutaan asentaa jokin tietty komponentti myöhemmässä vaiheessa, voidaan käyttää väliaikaista juotosmaskia. Väliaikasen maskin voi poistaa piirilevyä esimerkiksi käsin vetämällä. (7. s, 777 - 778.)

3.7 Loppupinnoitus


Piirilevyn valmistuksessa viimeisin vaihe on loppupinnoituksen tekeminen. Piirilevyn kuparipinta täytyy suojata, jotta se ei hapettuisi ja juotosprosessi olisi mahdollinen. Loppupinnoitteita on erilaisia ja jokaisella niistä on hyviä ja huonoja puolia. Loppupinnoituksen valintaan vaikuttaa asiakkaan vaatima tuote ja sen käyttöympäristö. Yleisimpiä loppupinnoitteita ovat muun muassa erilaiset tinan, kullan ja hopean seokset. (7, s. 751 - 770.)

4 VÄLIKERROSTEN ANALYSOINTI

4.1 Nykytila

Välikerrosten analysointi aloitettiin nykytilan kartoituksella. Aspocompilla on käytössään WiseTime-tuotannonohjausjärjestelmä, jonka avulla tutkittiin eri valmistuseriä. Ohjelmasta pystyttiin seuraamaan esimerkiksi kaikkia päätettyjä eriä, työvaiheita ja materiaaleja. Tärkeimpänä työkaluna käytettiin ART600-ohjelmaa, joka kertoi esimerkiksi kaikki venytykset ja mihin laatuluokkaan piirilevy kuului. Ohjelman avulla saatiin kaikki tarvittavat tiedot, joiden pohjalta pystyttiin suunnittelemaan tulevat venytysmuutokset. Olennaista oli tajuta, että jokainen välikerros venyy tai kutistuu hieman erilailla. Kuvassa 3 on venytyksien analysointiin käytetystä ART600-ohjelmasta kuva.

Layer	Dimension			
	x [ppm]	y [ppm]	x [mm]	y [mm]
2	-50	-195	-0,023	-0,103
3	24	26	0,011	0,014
4	-40	-43	-0,019	-0,023
5	-21	-39	-0,010	-0,020
6	-116	-111	-0,054	-0,059



VENYMÄT

KUVA 3. Venymien analysointiin käytetty ART600-ohjelma

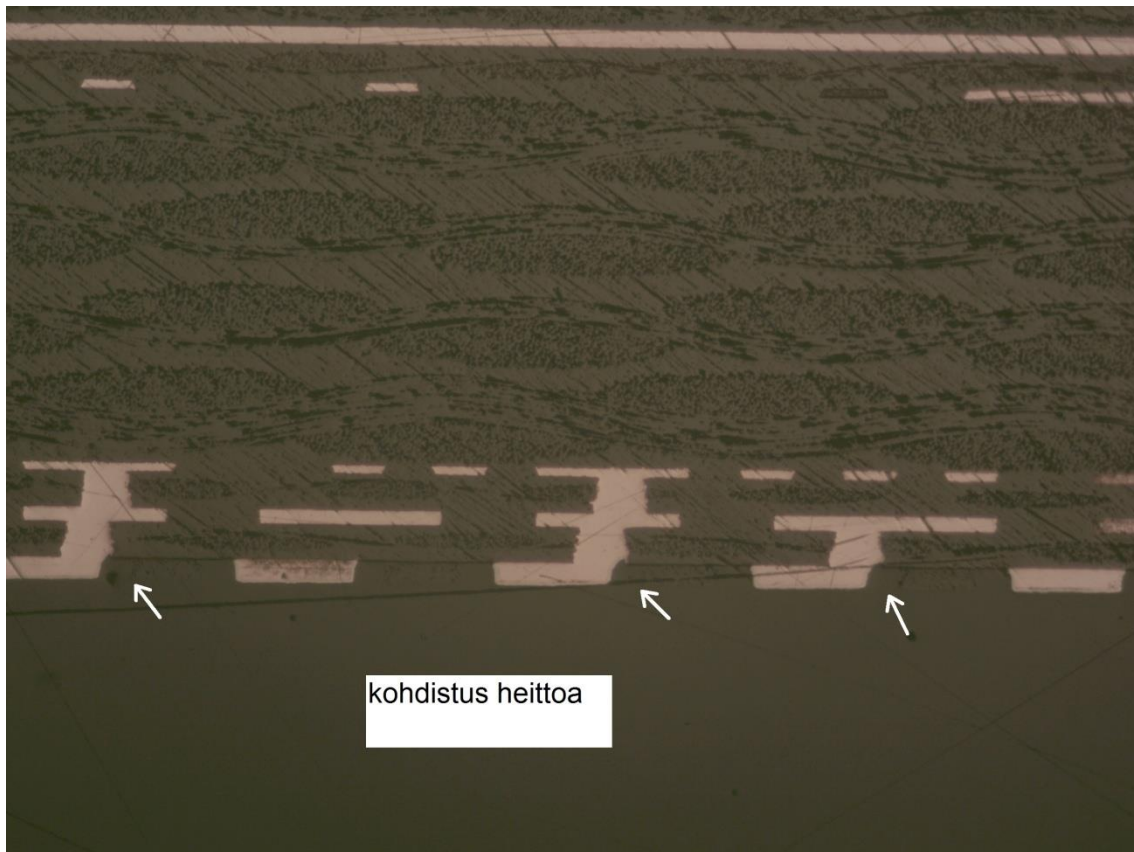
Yrityksen nykyinen toimintapa tehdä venytyksiä on arvioiva ja kokemukseen perustuva. Jos tuotantoon tulee erä tuttua tuotetta, tehdään venytykset vanhojen venytysten mukaisesti. Yrityksen tiedostoista löytyy tietopankki, joka kertoo muun muassa materiaalit, joita voidaan käyttää. Materiaalitietojen pohjalta sekä hyväksi käyttämällä edellisiä eriä tuotannonsuunnittelija tekee venytykset tuotteeseen. Venytyksiä korjataan vasta kun huomataan, että venymät menevät huomattavasti yli normaalipoikkeamasta. Tämä tapahtuu usein silloin, kun poikkeama on noin $\pm 100 \mu\text{m}$. Kokonaan uuden tuotteen tullessa tuotantoon valmistetaan tarvittaessa yksi koe-erä, johon tehdään venytykset arvioivasti. Tämän jälkeen venytyksiä muokataan paremman saannon aikaansaamiseksi. Haasteena on materiaalien vaihtuvuus, josta kerrotaan myöhemmissä luvuissa. Ve-

nytyksiä tehtäessä on otettava huomioon piirilevyn x-y-suunnat. Nämä suunnat käyvät ilmi kuvasta 4.



KUVA 4. Piirilevyaihion x-y-suunnat (11)

Kuvassa 5 näkyy kohdistusheittoa. Venytykset eivät heitä mahdottomasti, mutta kuitenkin koko aihion matkalla 150 - 200 μm . Jos venytykset olisivat täydelliset, olisivat laserit päällekkäin ja kohtisuorassa.

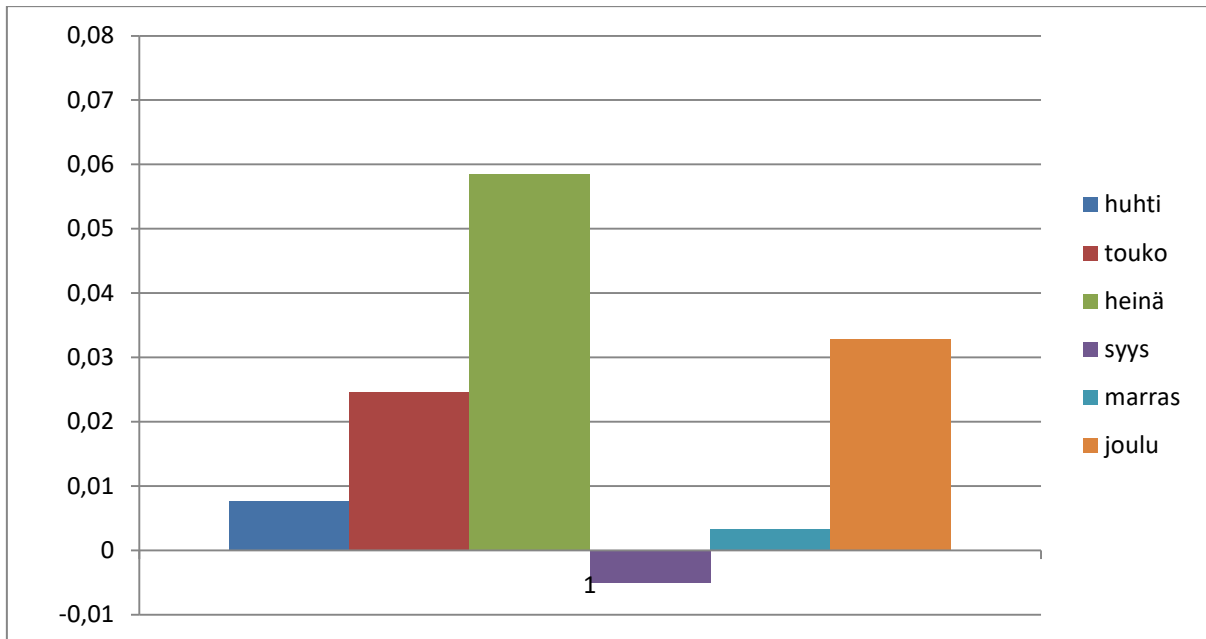


KUVA 5. Kohdistusheittoa piirilevyllä (12)

4.2 Lämpötilojen vaihteluiden aiheuttamat muutokset venytyksissä

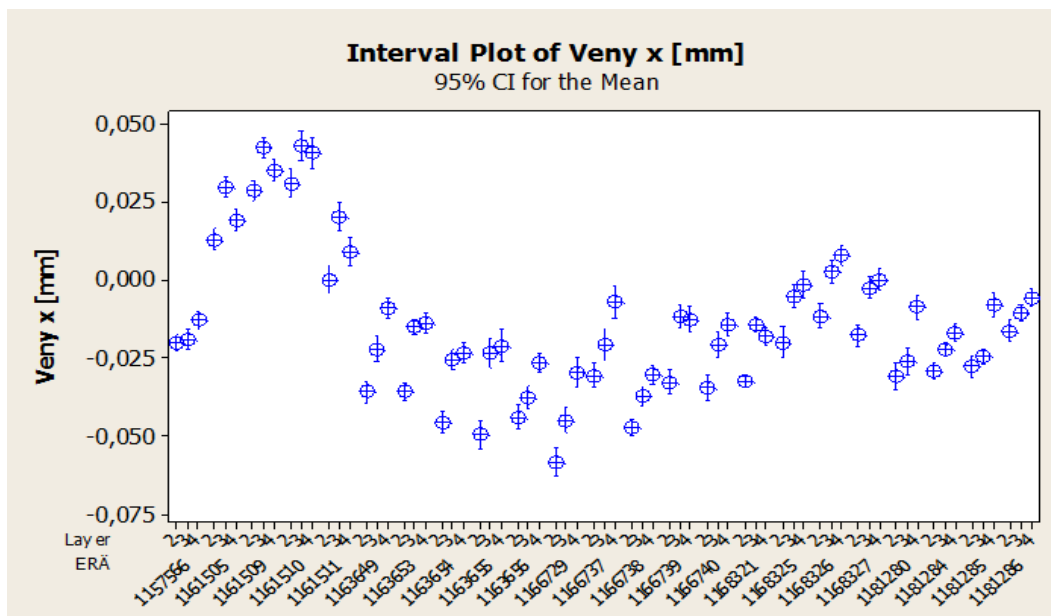
Venymien vaihteluiden syntyyn liittyy muitakin tekijöitä kuin prässäysprosessi. Monimuotoisen valmistusprosessin takia venytyksien teossa tulisi ottaa huomioon lämmön aiheuttamat tekijät. Piirilevyt seisovat pitkiäkin aikoja välivarastoissa, joissa lämpötilat vaihtelevat. Eri puolilla tehdasta lämpötilat vaihtelevat mitausten mukaan $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kesäisin tehtaassa on lämpimämpää kuin talvisin.

Lämpötilojen vaihteluiden vaikutuksia tutkittiin 8-kerroslevyssä AB161432. Kyseistä tuotetta on valmistettu eri vuodenaikoina samoista materiaaleista, joten sen tutkiminen oli järkevää. Tutkimuksissa selvisi, että kesäaikana venymät tuotteessa ovat selvästi suuremmat kuin kylminä vuodenaikoina. Tämä tieto vaikuttaa olennaisesti venytyksien tekoon. Kesällä tehdas lämpötila nousee, jolloin myös lämpölaajenemisen seurauksena venymät piirilevyissä kasvavat. Kuvassa 6 on esitettyinä x-y-suuntien keskiarvoiset venytykset tuotteessa eri vuodenaikoina.



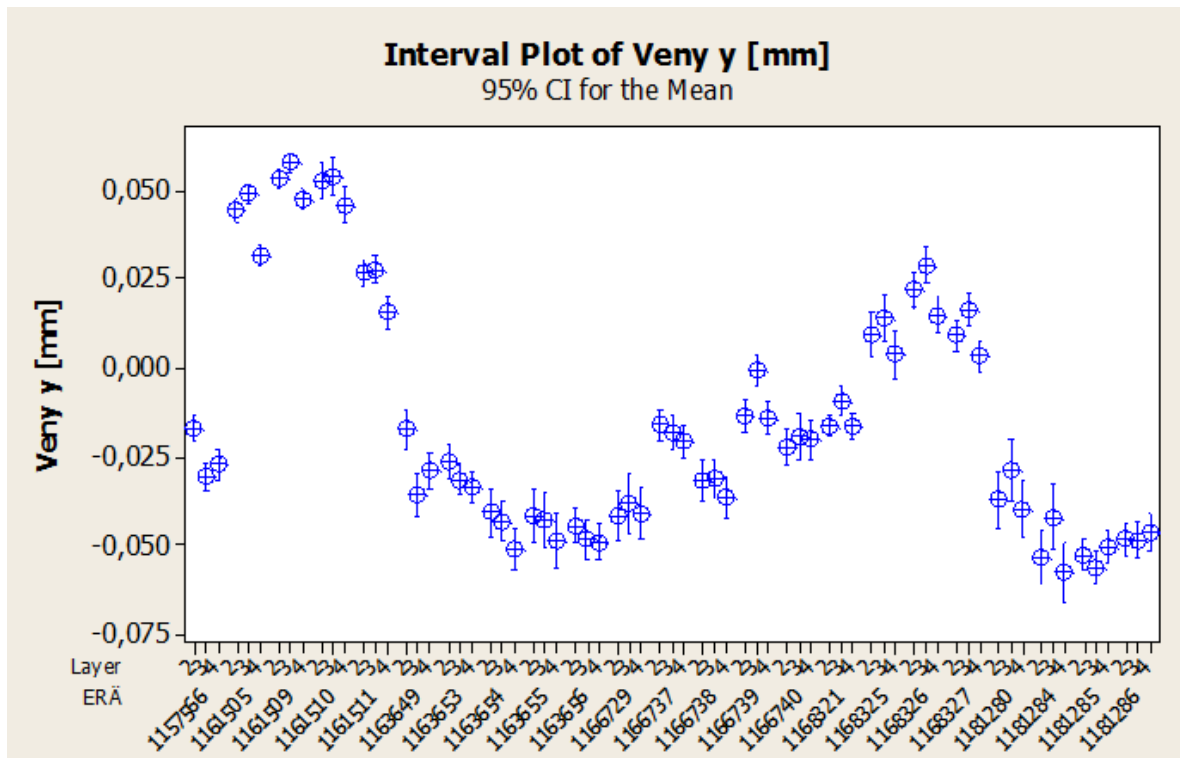
KUVA 6. Keskiarvoiset venytykset eri vuodenaikoina välillä 0,08 mm...-0,01 mm

Kuvasta 7 ilmenee venymät x-suunnassa välikerroskohtaisesti tuotteelle AB161432. Kuvaajat on muodostettu 95 %:n luottamusasteella MiniTab-ohjelmalla ja tuloksiin on otettu huomioon kaikkien välikerrosten kaikki venymät. Tähän tuotteeseen ei ole tehty venytysten muokkaamista.



KUVA 7. Kaikkien kerrosten venymät välikerroskohtaisesti x-suunnassa ilman venytysten muokkaamista tuotteessa AB161432.

Kuvasta 8 ilmenee venymät y-suunnassa välikerroskohtaisesti tuotteelle AB161432. Kuvaajat on muodostettu 95 %:n luottamusasteella MiniTab-ohjelmalla ja tuloksiin on otettu huomioon kaikkien välikerrosten kaikki venymät. Tähän tuotteeseen ei ole tehty venytysten muokkaamista.



KUVA 8. Kaikkien kerrosten venymät välikerroskohtaisesti y-suunnassa ilman venytyksien muokkaamista tuotteessa AB161432.

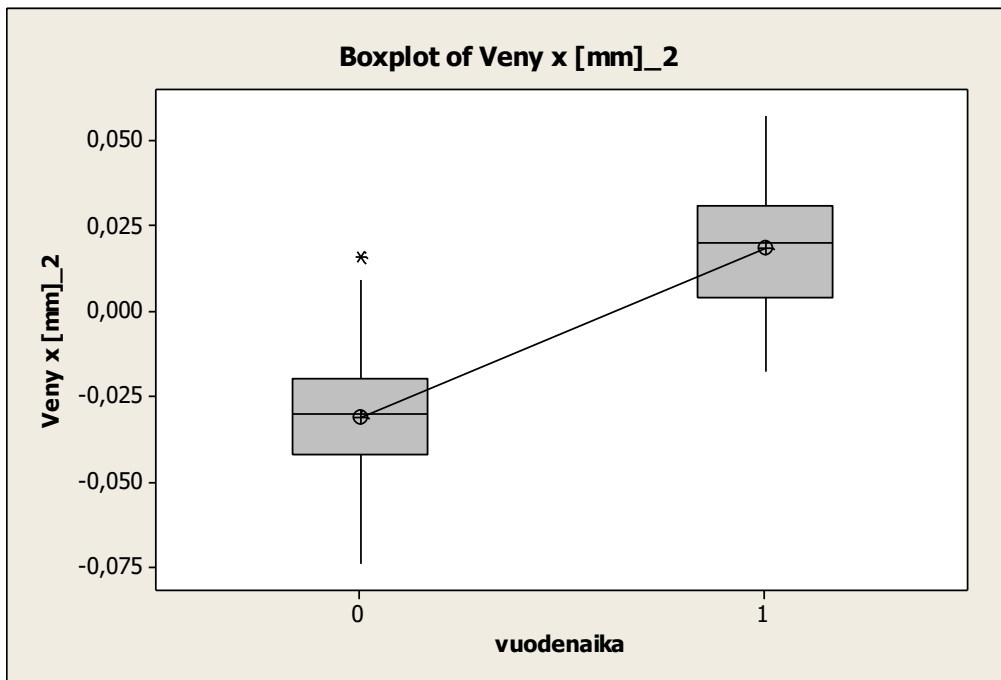
Kuvista 7 ja 8 voidaan nähdä, että kerrokset kulkevat melko limittäin toisiaan nähden, joka on hyvä asia kerrosten kohdistuvuuden kannalta. Lisäksi venymistä voi havaita selkeän nousun heinäkuun kohdalla esimerkiksi erissä 1161510 ja 1161509. Tämä nousu ei selity pelkästään lämpötilavaihteluiden takia.

Lämpötiloista johtuvaa vaihtelua tutkittiin myös tuotteessa EO160533. Tästä ja tuotteesta AB161432 muodostettiin MiniTab-ohjelman avulla taulukoita, joiden perusteella pystyttiin hahmottamaan lämpötiloista aiheutunutta eroa. Tuotteet ovat rakenteeltaan hyvin samanlaiset. Kesävuodenaikoja päätettiin verrata kaikkiin muihin vuodenaikoihin ja näistä tuloksista laskettiin keskiarvo.

Tuotteelle AB mitattiin venymien olevan kesällä x-suunnassa 47 μm ja y-suunnassa 67 μm suuremmat, kuin muina vuodenaikoina. Venymiin eri tuotte-

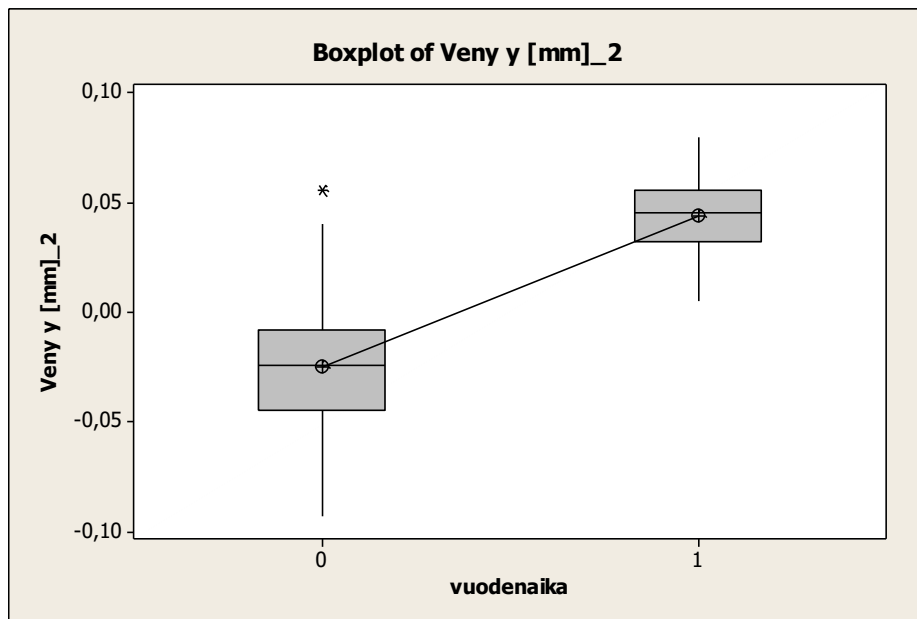
den välillä vaikuttaa myös kuparin määrä. Mitä enemmän kuparia on, sitä suurempi lämpölaajenemiskerroin. Tämän takia vaihtelua esiintyy eri välikerroksissa.

Kuvassa 9 on eriteltyinä kesävuodenajat x-suunnassa verrattuna muihin vuodenaikoihin. Kuvasta voidaan huomata kesävuodenaikojen olevan selvästi korkeammalla, mikä tarkoittaa, että välikerrokset ovat venyneet enemmän lämpölaajenemisen takia. Kuva on muodostettu 95 %:n luottamusasteella.



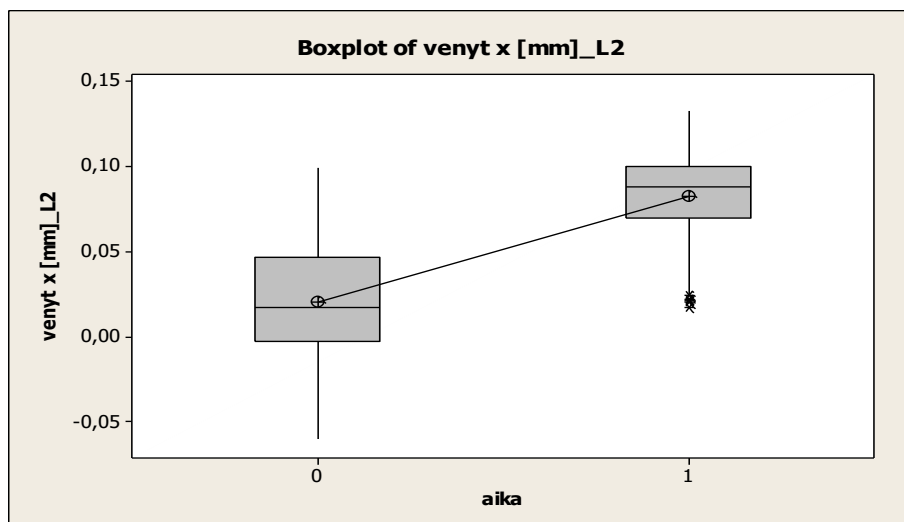
KUVA 9. Tuotteen AB161432 kesävuodenajan venymät 2. välikerroksessa verrattuna muihin vuodenaikoihin x-suunnassa. 0=muut vuodenaajat, 1=kesäajat.

Kuvassa 10 on eriteltyinä saman tuotteen kesävuodenajat y-suunnassa verrattuna muihin vuodenaikoihin. Kuva on muodostettu 95 %:n luottamusasteella.



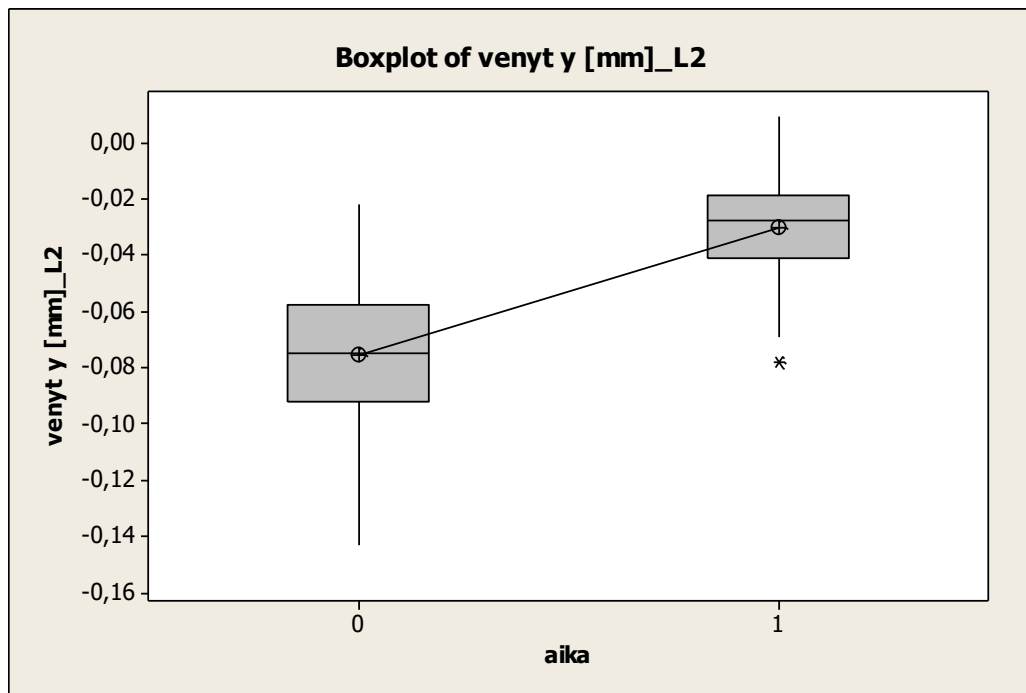
KUVA 10. Tuotteen AB161432 kesävuodenajan venymät 2. välikerroksessa verrattuna muihin vuodenaikoihin y-suunnassa. 0=muut vuodenaikat, 1=kesäajat.

Kuvassa 11 on tuotteen EO160533 venymät x-suunnassa verrattuna muihin vuoden aikoihin. Tälle tuotteelle kesäajan venymät olivat x-suunnassa 43 μm ja y-suunnassa 45 μm suuremmat kuin muina vuodenaikoina Kuva on muodostettu 95 %:n luottamusasteella.



KUVA 11. Tuotteen EO160533 kesävuodenajan venymät 2.välikerroksessa verrattuna muihin vuodenaikoihin x-suunnassa. 0=muut vuodenaikat, 1=kesäajat

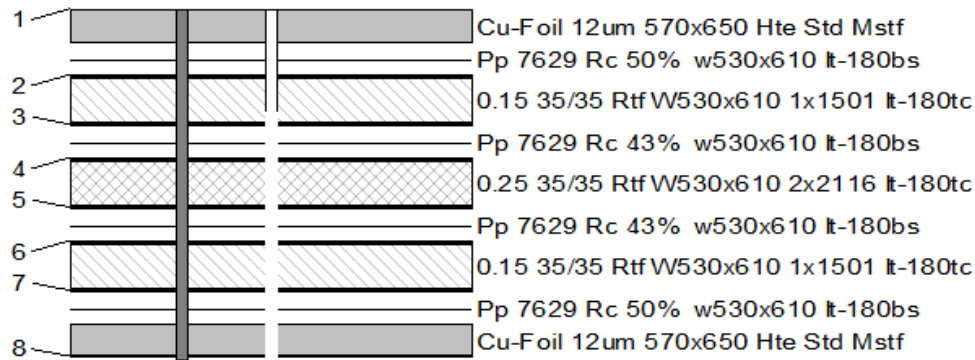
Kuvassa 12 on tuotteen EO160533 venymät y-suunnassa verrattuna muihin vuoden aikoihin. Kuva on muodostettu 95 %:n luottamusasteella.



KUVA 12. Tuotteen EO160533 kesävuodenajan venymät 2. välikerroksessa verrattuna muihin vuodenaikoihin y-suunnassa. 0=muut vuodenaikat, 1=kesäajat.

4.3 Materiaali vaihteluiden aiheuttamat muutokset venytyksissä

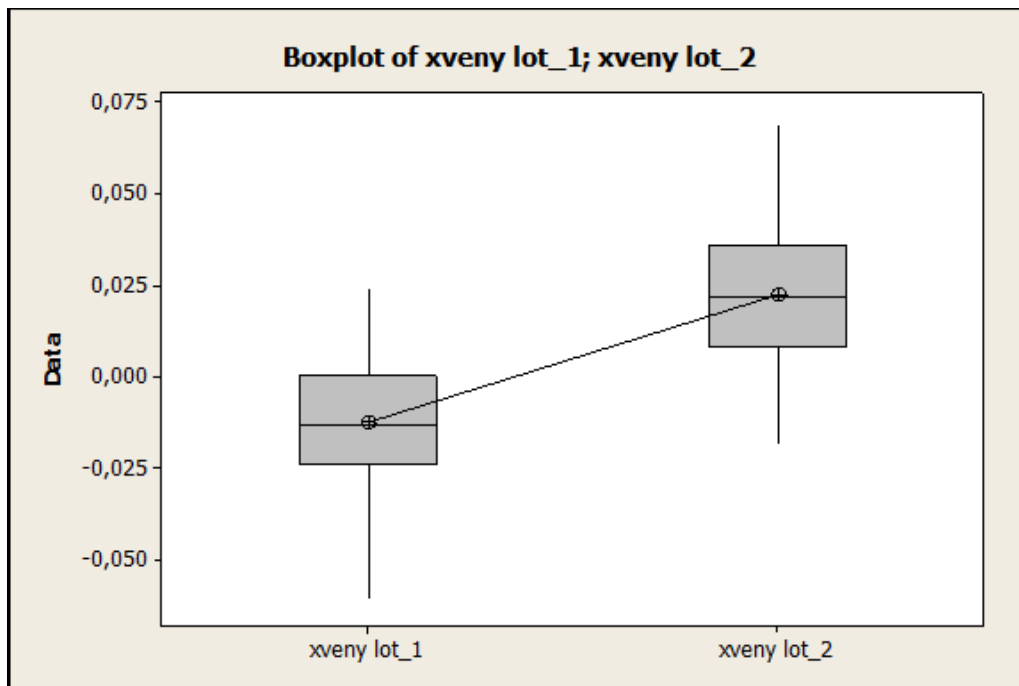
Lämpötilojen lisäksi tutkittiin erilaisia materiaaleja, joita käytetään piirilevyn valmistuksessa. Jokainen tuote poikkeaa jonkin verran toisistaan materiaalien suhteen, riippuen asiakkaan haluamasta tuotteesta. Välikerrosten valmistukseen käytetään eri materiaaleja, jotka poikkeavat toisistaan esimerkiksi lämpölaajenemiskertoimen ja eristevälipaksuuden osilta. Tämä tarkoittaa, että valmistuksessa on käytettävä eri materiaaleja, jotta lopputuotteesta tulee toimiva. Kuvassa 13 on eri materiaaleja, joita voidaan esimerkiksi käyttää tuotteen valmistukseen.



KUVA 13. Välikerrosmateriaalit

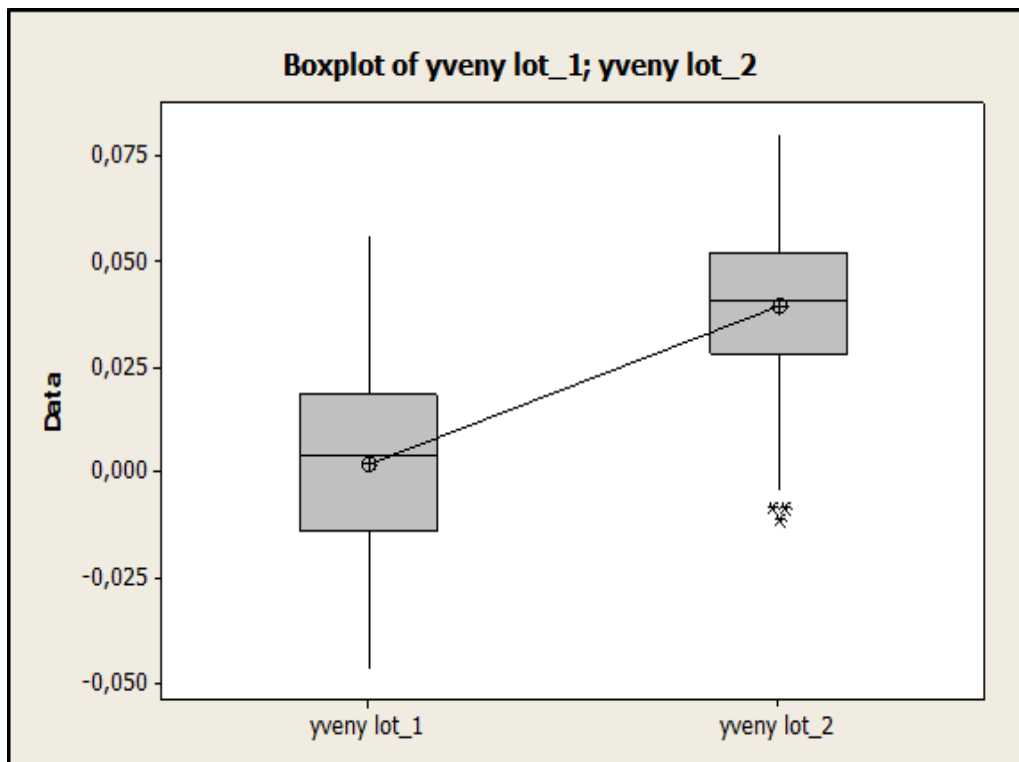
Valmistuserästä käytetään nimitystä lot. Tuotteiden vaihtuessa vaihtuvat myös lot-numerot. Tuotteen sisälläkin voi tapahtua lot-numeroiden vaihtelua. Tämä tarkoittaa, että materiaalit ovat samat, mutta tuote on valmistettu eri toimituserästä. Näin voi käydä esimerkiksi, jos samaa tuotetta valmistetaan suuria eriä, jolloin saman toimituserän materiaalit eivät riitä valmistamaan kaikkia haluttuja tuotteita. Lot-vaihtelut vaikuttavat myös välikerrosten venytysten tekemiseen, sillä välikerrosmateriaalien toimittaja ei lupaa täysin samoja arvoja jokaiselle toimituserälle. Näitä vaihteluita tutkittiin MiniTab-ohjelmalla tuotteissa AB161432 ja EO160533, sillä ne ovat rakenteeltaan samanlaisia tuotteita. Tutkimuksiin kerättiin tiedot jokaisesta välikerroksesta ART600-ohjelmaa hyväksikäyttäen.

Tutkimusten perusteella lotin vaihtuessa venymät voivat muuttua molemmissa x- ja y-suunnissa 38 µm. Erät on valmistettu kahden kuukauden sisällä talvella, joten lämpötilavaihtelut eivät ole merkittävä tekijä tässä tuloksessa. Kuvassa 14 on vertailtu kolmen eri lotin vaihteluita x-suunnassa.



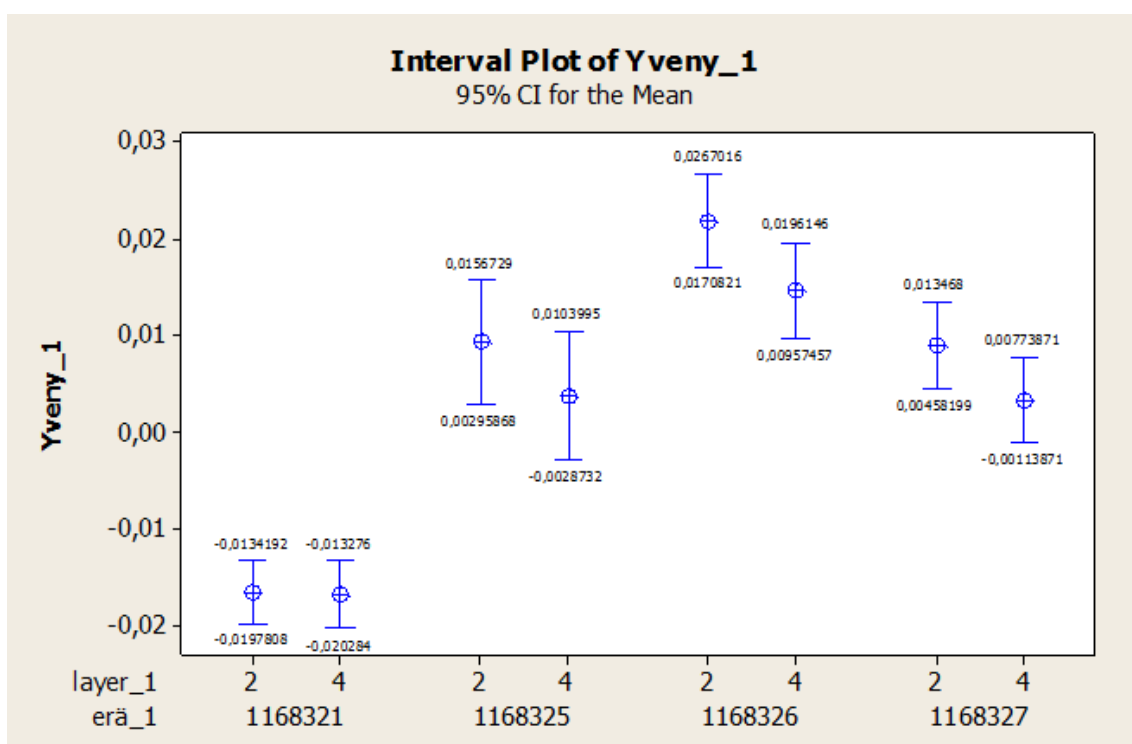
KUVA 14. Lot vaihtelut x-suunnassa

Kuvassa 15 on vertailtu kolmen eri lotin vaihteluita y-suunnassa. Kuvista voidaan päätellä molempien suuntien muutosten olevan lähes sama.



KUVA 15. Lot vaihtelut y-suunnassa.

Analysoinnissa perehdyttiin myös lotien sisäiseen vaihteluun, joka tutkimusten mukaan x-y-suunnissa on $\pm 20 \mu\text{m}$. Tutkimuksissa hyödynnettiin MiniTab-ohjelmaa, joka kertoi erän sisäisen vaihtelun 95% todennäköisyydellä. Sisäistä vaihtelua vertailtiin neljän eri erän kesken ja tutkittava tuote oli AB161432. Kuvassa 16 on eriteltynä tuotantoeriä, joista voidaan päätellä lotin sisäisen vaihtelun olevan suurimmillaan $\pm 20 \mu\text{m}$. Esimerkiksi eränumeron 1168321 neljännen välikerroksen sisäinen vaihtelu y-suunnassa on minimissään $-20,3 \mu\text{m}$ ja eränumeron 1168326 vaihtelu y-suunnassa on maksimissaan $19,6 \mu\text{m}$. Tästä huomataan, että sisäinen vaihtelu on välillä $\pm 20 \mu\text{m}$.



Kuva 16. Lotin sisäinen vaihtelu.

4.4 Laatu luokat

Yrityksellä on käytössään eri laatu luokkia poratuille piirilevyille. Näitä luokkia voitiin tarkastella ART600-ohjelmalla. Laatu luokan määrää muun muassa poraamis- ja venytystarkkuus. Laatu luokkia on neljää erilaista. Luokat 1-2 kuuluvat ylempään laatuun ja luokat 3-4 alempaan laatuun. Alemman laatu luokituksen saaneet levyt aiheuttavat todennäköisimmin oikosulkuja piirilevyssä. Laatu luok-

kia voidaan tarkastella porauksen jälkeen jäljelle jäävän kauluksen avulla. ART600-ohjelmassa tätä kutsutaan residual ringiksi. Se kuvaa, kuinka hyvin poraus on onnistunut välikerrosten keskelle. Laatuluokat on jaettu seuraavasti alla olevaan taulukkoon.

Taulukko 1. Laatuluokat

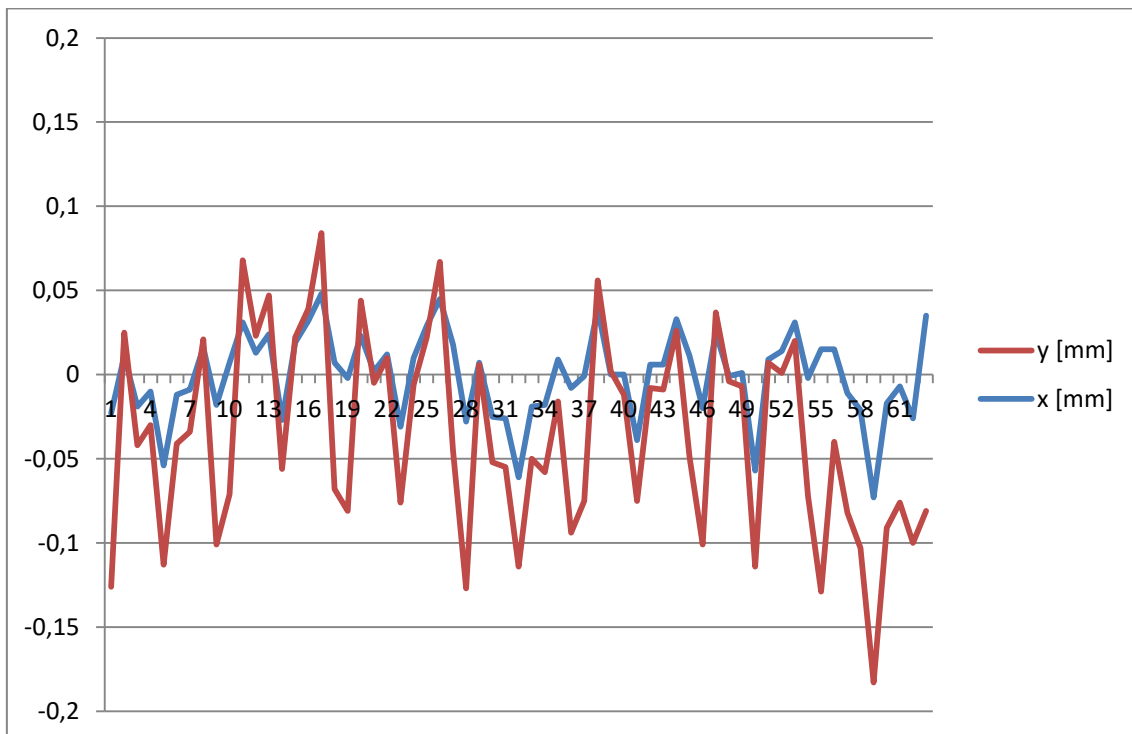
Laatuluokka	Jäljelle jäävä kaulus [μm]
Q1	250-150
Q2	150-100
Q3	100-0
Q4	0

5 OPTIMAALISEN MUUTOKSEN TEKO JA SEURANTA

5.1 Tutkittava tuote

Tuotteeksi valittiin 18-kerroslevy NE164735, koska tuotannossa tätä kyseistä tuotetta alettiin juuri valmistaa. Lisäksi tuotetta oli aikaisemmin valmistettu paljon, mikä mahdollisti lisätiedon etsimisen tuotteesta. Alussa tutkittiin Excel-ohjelman avulla muun muassa kaikkien välikerrosten keskiarvovenymät, nykyiset venytykset ja mahdollinen optimaalinen venytyksen suurentaminen tai pienentäminen. Tehtävänä oli löytää suurusluokka, jolla pystyttiin tekemään venytyksiä mahdollisimman hyvän saannon aikaansaamiseksi niin, että hajonta pysyisi vähintään nykyisenä.

Alkutilannetta kuvattiin kuvasta 17 nähtävällä tavalla, jossa on tutkittu eräkohtaisesti keskiarvovenymät koko tuotteelle x-y-suunnassa ennen optimaalisten venytysten tekoa. Kuvaajat tulisivat olla mahdollisimman lähellä 0-akselia, jotta laatuluokka ja saanto olisivat mahdollisimman hyvät.



KUVA 17. Nykyiset venytykset valitussa tuotteessa välillä 0,2 mm...–0,2 mm

5.2 Muutosten teko ja seuranta

Optimaaliset muutokset päätettiin tehdä huomioimatta lot- ja lämpötilavaihteluita, sillä tämä oli ensimmäinen kerta, jolloin paneuduttiin jokaiseen välikerrokseen näin suurella tarkkuudella. Tarkoitus oli saada tieto siitä, millä suurusluokalla muutosten teko on kannattavaa. Alustava arvio oli, että mikäli venymämuutos välikerroksessa poikkeaa $\pm 50 \mu\text{m}$ - $100 \mu\text{m}$, on muutoksen teko kannattavaa. Pää tarkoitus oli saada välikerroksista saman pituisia venymiä muokkamalla, jolloin välikerrosten kohdistusmerkit osuisivat täydellisesti tai lähes täydellisesti toisiinsa. Lisäksi pyrittiin parantamaan välikerrosten kohdistuvuutta toisiinsa nähden. Alkuperäiset venytykset tutkittavalle tuotteelle NE164735 ovat listattuna taulukossa 2.

Taulukko 2. Alkuperäiset venytykset tutkittavassa tuotteessa [mm].

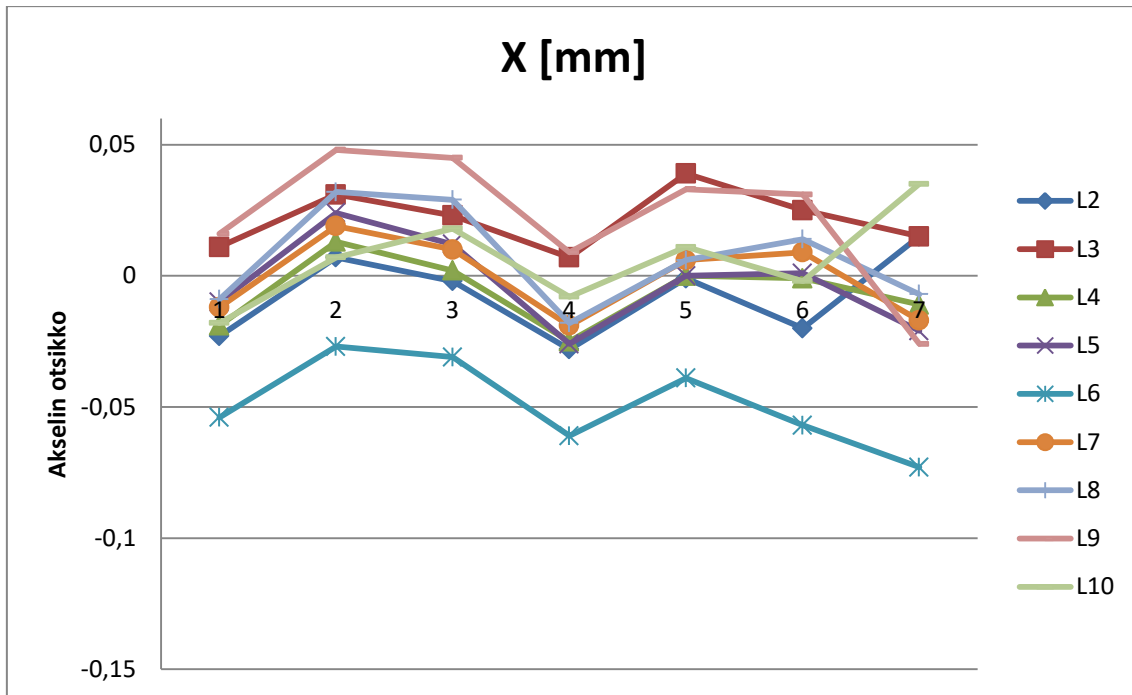
X-suunta 530 mm	100,11	100,03	100,03	100,03	100,04	100,03	100,03	100,02	100,11
Y-suunta 610 mm	100,12	100,03	100,03	100,03	100,04	100,03	100,03	100,03	100,11
Välikerros	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Muutoksien teko jaettiin kahteen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa muutos suoritettiin kahden desimaalin tarkkuudella ja toisessa vaiheessa kolmen desimaalin tarkkuudella. Kaikki muutokset tehtiin tuotteeseen NE164735 saatujen arvojen perusteella Excel-tilukointia hyväksikäyttäen. Arvot saatiin analysoimalla ensin nykyisiä venytyksiä, jotka haettiin ART600-ohjelmalla. Tämän jälkeen tarkasteltiin sisäkerrosprosessin ja porausprosessin jälkeisiä tiloja, joita hydyntämällä saatiin optimaalinen venytyksen lisäys tai vähennys. Taulukossa 3 on listattu optimaaliset venytykset tuotteelle.

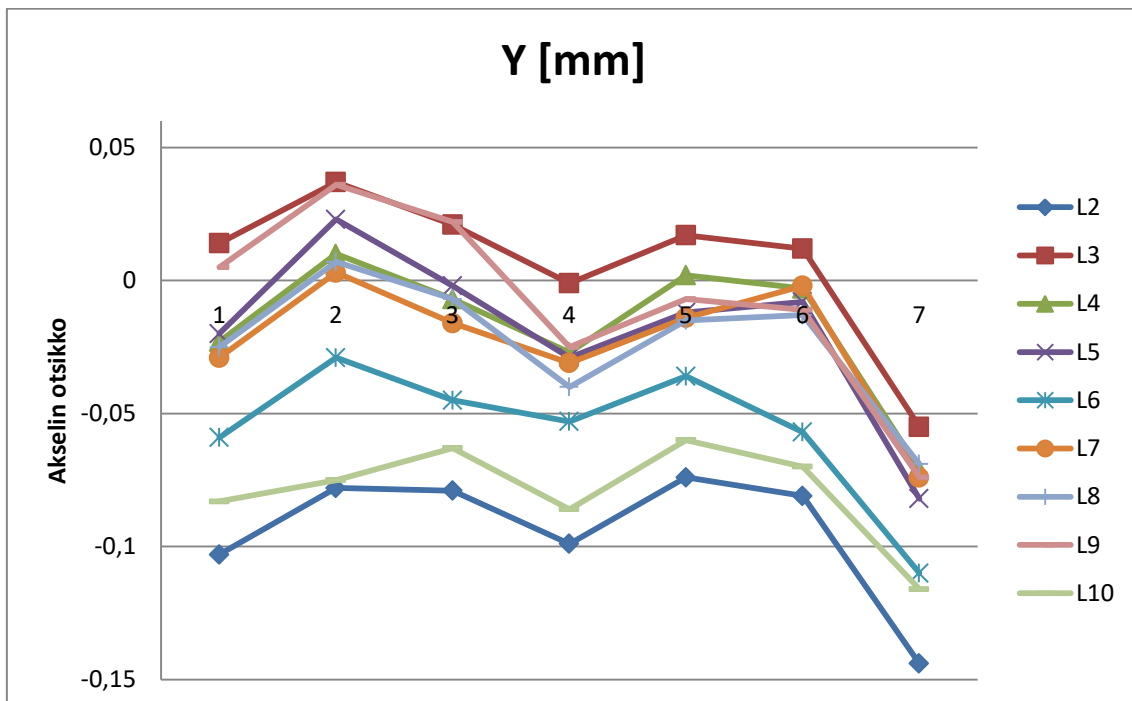
Taulukko 3. Kolmen desimaalin tarkkuudella optimoidut venytykset tutkittavassa tuotteessa [mm].

X-suunta 530 mm	100,107	100,022	100,027	100,025	100,033	100,025	100,025	100,020	100,104
Y-suunta 610 mm	100,118	100,032	100,036	100,033	100,038	100,036	100,038	100,035	100,117
Välikerros	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Seuraava vaihe oli valmistaa piirilevyt optimoituja arvoja hyväksikäyttäen. Venytysten optimoinnin jälkeen huomattiin, että välikerrosten välinen kohdistuvuus on selvästi parantunut. Kerrosten mitat ovat samassa suhteessa, mutta erien välillä tapahtuu venytysmuutoksia. Paras teoreettinen tulos olisi, jos välikerrokset olisivat täydellisesti kohdikkain ja kulkisivat mahdollisimman lähellä arvoa 0 µm. Kuvissa 18 ja 19 on verrattu tuotteen NE164735 alkutilannetta ennen muutoksia. Kuvat muodostettiin välikerroksittain Excel-ohjelmaa käyttäen. Tämän avulla pystyttiin tarkastelemaan jokaista välikerrosta erikseen.

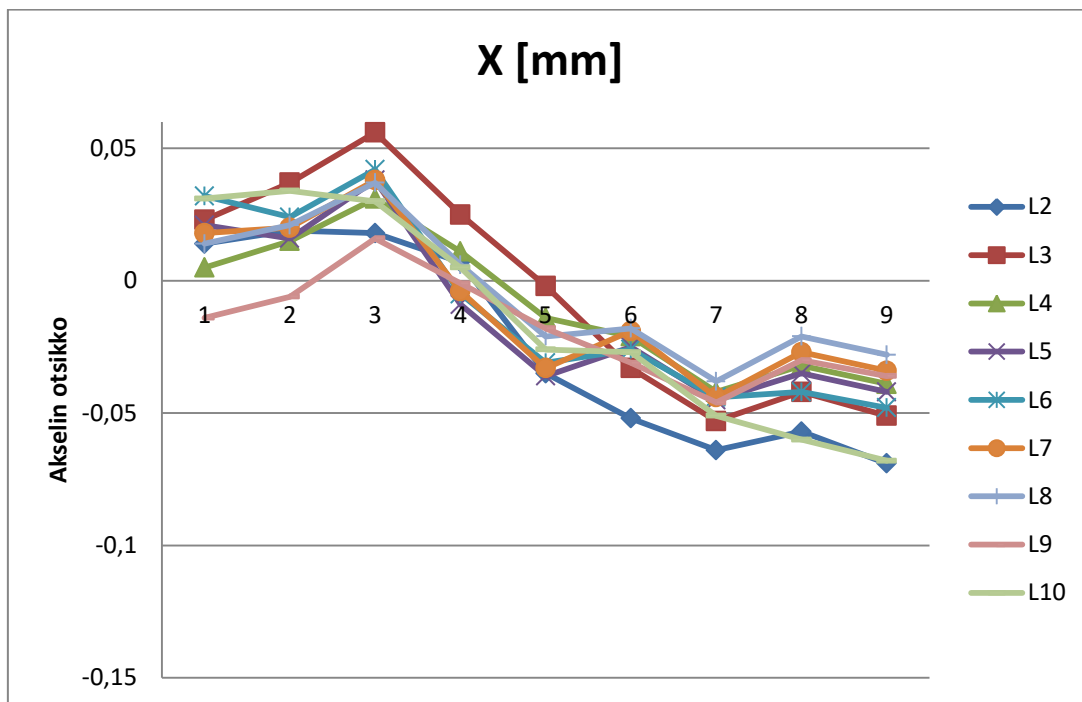


KUVA 18. Venytykset valitussa tuotteessa ennen muutoksia x-suunnan suhteen.

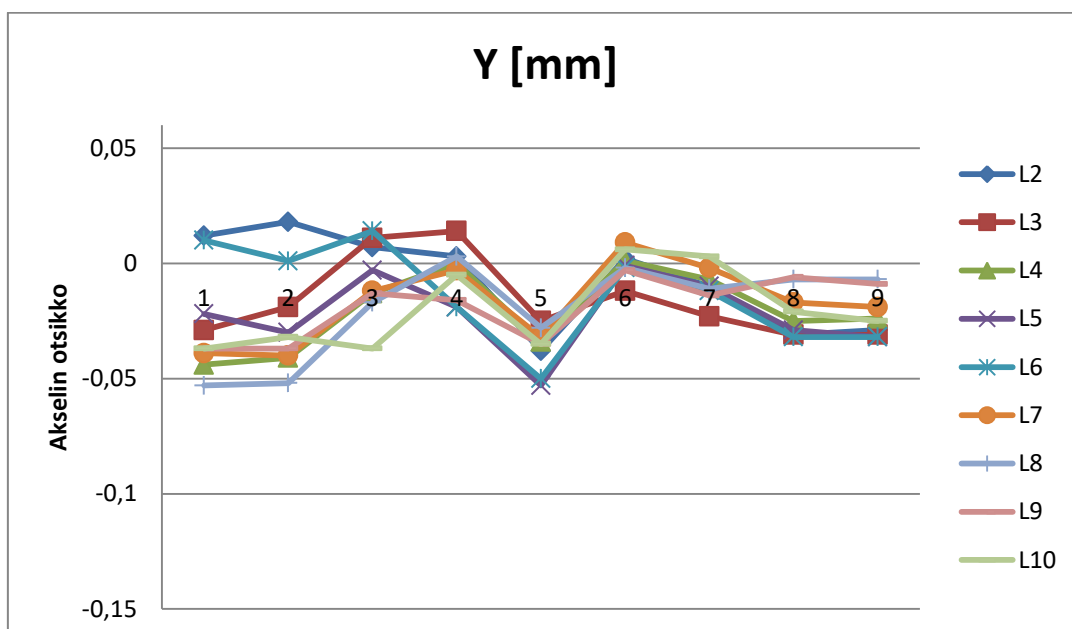


KUVA 19. Venytykset valitussa tuotteessa ennen muutoksia y-suunnan suhteen.

Kuvat 20 ja 21 kuvaavat lopputilannetta muutoksien jälkeen. Kohdistuvuus on parantunut, mutta erien välillä tapahtuu venytysmuutoksia.

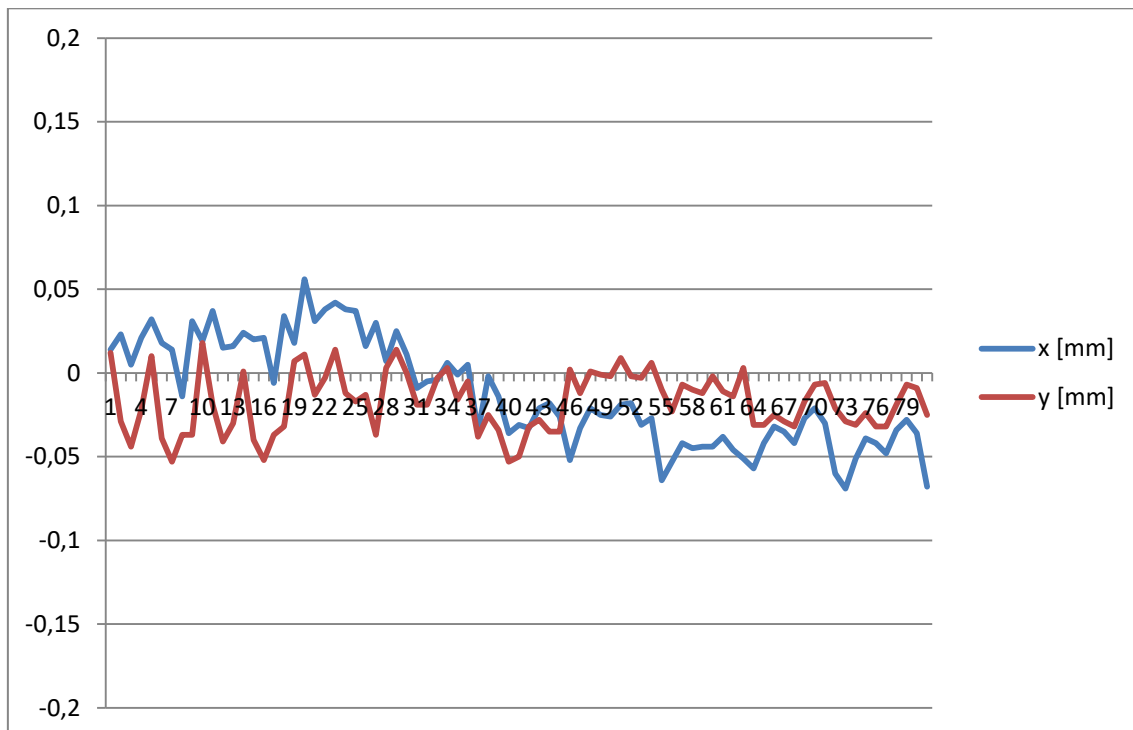


Kuva 20. Venytykset valitussa tuotteessa optimoinnin jälkeen x-suunnan suhteen.



Kuva 21. Venytykset valitussa tuotteessa optimoinnin jälkeen y-suunnan suhteen.

Venymien täydellinen onnistuminen ei käytännössä ole mahdollista, mutta pyrkimyksenä olisi mahdollisimman hyvä kohdistuvuus ja saanto. Mittalaitteista johtuvat virheet, sekä valotustarkkuus ja porakoneiden tarkkuudet eivät aina pysy samana. Näissä prosessin vaiheissa syntyy aina hieman luonnollista vaihtelua. Yksinkertaisesti sanottuna laitteiden toistotarkkuus ei aina pysy samassa tasossa, mikä aiheuttaa muutoksia venymissä. Lopputilannetta kuvattiin kuvasta 22 nähtävällä tavalla, jossa on tutkittu eräkohtaisesti keskiarvovenymät koko tuotteelle x-y-suunnassa optimaalisten venytysten tekemisen jälkeen. Kuvaajat tulisivat olla mahdollisimman lähellä 0-akselia, jotta laatuluokka ja saanto olisivat mahdollisimman hyvät.



KUVA 22. Optimaaliset venytykset valitussa tuotteessa välillä 0,2 mm...–0,2 mm.

6 YHTEENVETO

Työssä tutkittiin monikerrospiirilevyn valmistusprosessia ja analysoitiin syntyneitä venytyksiä valituissa tuotteissa. Tavoitteena oli optimoida venytykset, parantaa saantoa ja pohtia näiden kahden asian vaikutuksia yhtiön liiketoimintaan. Olennaista oli hahmottaa lämpötiloista ja materiaalivaihteluista aiheutuvat erot.

Työn pohjalta saatiin tieto, että materiaalien eli lotin vaihtuessa voivat venymät muuttua $38\text{ }\mu\text{m}$ ja lotin sisäinen vaihtelu on $\pm 20\text{ }\mu\text{m}$. Tämä tarkoittaa sitä, ettei venytyksiä ainakaan kannata muokata silloin, kun nykyiset venymät poikkeavat $\pm 40\text{ }\mu\text{m}$ optimaalisesta arvosta. Aina kun laitetaan erä tuotantoon, tulisi katsoa venytykset edellisistä eristä ja ottaa huomioon lot-vaihtelut, vuodenaika ja viimeisin valmistusajankohta. Jos tuotetta ei ole prässätty viimeiseen kahteen kuukauteen, herkkiä venytysmuutoksia tulisi välttää. Lisäksi joistakin tuotteista, joita on valmistettu paljon, olisi hyvä kerryttää tietoja välikerroskohtaisesti pitkältä aikaväliltä esimerkiksi MiniTab- tai Excel-ohjelmien avulla. Näitä tietoja hyväksikäyttämällä tuotannonsuunnittelijan olisi helpompi arvioida venytykset tulevaan tuotantoerään.

Venytysten optimoinnin jälkeen kerrosten mitat saatiin samaan suhteeseen, mutta erien välillä tapahtuu venymien muutoksia. Välikerrosten optimointi suoritettiin ennen varsinaisia tutkimustuloksia lämpötila- ja lot-vaihteluista, mikä vaikutti myös tuloksiin. Mikäli tutkimukset olisi tehty ennen levyjen optimointia, olisi tulos voinut olla hieman parempi. Tällöin välikerrokset olisi voitu saada kohdistettua päällekkäin ja oikeaan mittaan. Työ päätettiin kuitenkin suorittaa niin, että optimointi tehtiin ensimmäiseksi. Tästä saatiin tieto, ettei pelkästään laskelmallisesti tehty optimointi ole riittävä, vaan huomioon täytyy ottaa myös lot- ja lämpötilavaihtelut sekä ajankohta, jolloin kyseistä tuotetta on viimeksi valmistettu. Yritys tulee kuitenkin hyötymään liiketaloudellisesti, mikäli se hyödyntää opinnäytetyön saavutettuja tuloksia. Lisäksi opinnäytetyön tulos helpottaa tuotannonsuunnittelijan työtä venytyksien tekemisessä.

Saantoon vaikuttaa myös ilman kosteus sekä lämpötila. Optimoinnin kannalta on tärkeä ymmärtää, että kesäaikana venymät voivat olla $40 - 60\text{ }\mu\text{m}$ suuremmat kuin kylmempinä vuodenaikoina. Tuotteelle AB mitattiin venymien olevan

kesällä x-suunnassa 47 μm ja y-suunnassa 67 μm suuremmat kuin muina vuodenaikoina. Vastaavasti tuotteelle EO kesäajan venymät olivat x-suunnassa 43 μm ja y-suunnassa 45 μm suuremmat kuin muina vuodenaikoina. Tämä voidaan selittää sillä, että kesäisin tehtaassa lämpötila nousee, jolloin myös lämpölaajeneminen aiheuttaa välikerrosten venymistä. Välikerrosten optimoinnin takia tehtaassa olisi hyvä vallita tasainen lämpötila, oli vuodenaika mikä tahansa. Toinen huomattavasti halvempi keino on ottaa venytysten tekemisen yhteydessä huomioon senhetkinen lämpötila.

Opinnäytetyön pohjalta voidaan alkaa edelleen parantamaan piirilevyjen saantoa. Venymiä voidaan tarkastella samalla tarkkuudella kuin opinnäytetyössä useissa eri tuotteissa, jolloin saadaan enemmän tietoa vaihteluiden syistä. Yksi hyvä keino saada venytykset räätälöidyiksi jokaiselle tuotteelle olisi tehdä jokaisesta tuotteesta testikappale, johon haettaisiin oikeat venytykset ennen varsinaisen erän aloittamista tuotannossa. Tämä toimisi varsinkin kokonaan uuden tuotteen tullessa tuotantoon. Esiprässäys vie kuitenkin aikaa itse tuotteen valmistuksessa ja saattaisi aiheuttaa läpimenoaikojen kasvamista ja kiireellisten tuotteiden viivästymistä.

Venymien kontrolloimista voidaan myös parantaa uusilla investoinneilla. Lämpötila- ja kosteuskontrollitilat heti prässäyksen jälkeen parantaisivat saantoa, sillä piirilevyt olisivat koko ajan samassa lämpötilassa ennen röntgenporausmittausta. Näin ollen yritys voisi minimoida sisäisen vaihtelun piirilevyjen välillä.

LÄHTEET

1. Khandpur, R.S 2006. Printed Circuit Boards. Design, Fabrication, Testing and Assembly. The Mcgraw-Hill companies.
2. Historia. Aspocomp. Saatavissa:
<https://www.aspocomp.com/fi/yritys/historia>. Hakupäivä 12.1.2017.
3. Aspocomp. Valmistus Suomessa. Saatavissa:
<https://www.aspocomp.com/fi/valmistus/valmistus-suomessa>. Hakupäivä 20.5.2017.
4. Manufacturing. Aspocomp. Saatavissa:
<https://www.aspocomp.com/manufacturing>. Hakupäivä 12.1.2017.
5. Ikonen, Jorma 3.1.2001. Piirilevyjen valmistustekniikka. Läpikuparoidut reiät ja monikerroslevyt. Aspocomp Oyj.
6. Electronic materials and processes handbook 3rd edition. Yrityksen palvelimelta haettu pdf-tiedosto. Hakupäivä 20.1.2017. Aspocomp Oyj.
7. Printed circuits handbook, 6th edition. Yrityksen palvelimelta haettu pdf-tiedosto. Hakupäivä 26.1.2017. Aspocomp Oyj.
8. Toimihenkilöiden haastattelu 2.2.2017. Aspocomp Oyj.
9. Products. Schmoll Maschinen GmbH 2011. Saatavissa: <http://www.schmoll-maschinen.de/en/products/mxy-ccd-systems/technical-data.html>. Hakupäivä 13.1.2017.
10. Poraosaston työntekijän haastattelu 16.1.2017. Aspocomp Oyj.
11. Opinnäytetyöntekijän ottama kuva tuotannosta 13.2.2017.
12. Sirviö, Hannu-Heikki 2017. Re: Kohdistusheittoa. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja: Tomi Latvala 16.1.2017.